

УДК 531.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТКАНЕВЫХ БРОНЕЖИЛЕТАХ И В ТЕЛЕ ЧЕЛОВЕКА НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КЛАСТЕРЕ “СКИФ УРАЛ”

Н. Ю. Долганина¹, С. Б. Сапожников¹, А. А. Маричева¹

Рассматривается численное моделирование ударных процессов в тканевых бронежилетах и теле человека. С применением пакета SolidWorks построена модель скелета грудной клетки человека. Проведены численные эксперименты с использованием пакета программ LS-DYNA по исследованию масштабируемости задач динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами различных размеров и разным количеством слоев, а также динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 10-07-96007-р_урал_а). Статья подготовлена по материалам доклада авторов на международной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (ПаВТ-2010; <http://agora.guru.ru/pavt>).

Ключевые слова: тканевый бронежилет, удар, конечно-элементная модель, грудная клетка человека, суперкомпьютерное моделирование.

1. Введение. Основной задачей при проектировании бронежилетов является минимизация их массы при сохранении заданного уровня защиты. Проверка качества бронежилета, не находящегося в контакте с защищаемым объектом, проводится с определением баллистического предела [1]. Если же бронежилет контактирует с защищаемым объектом (тело человека), то в этом случае существует критерий определения тупой травмы, который применяется для сравнения бронежилетов различных классов (рис. 1) [2, 3]. В экспериментах в качестве тела человека используют или технический пластилин (при этом довольно сложно оценить степень травмирования тела человека), или дорогостоящие экспериментальные модели грудной клетки [4]. Экспериментально-аналитический путь оптимизации конструкции многослойных тканевых преград позволяет достаточно быстро определить оптимальное соотношение параметров для фиксированного воздействия (конкретных формы индентора и скорости нагружения), однако этот метод весьма затратный [5].

Чисто аналитических моделей, точно описывающих процесс динамического взаимодействия пули и бронежилета с учетом разрушения, на данный момент не существует и, очевидно, их получение невозможно из-за сложности физических явлений, происходящих в этом процессе: большие перемещения, скольжение, фрикционные контакты, повышение температуры. Для того чтобы учесть эти сложные физические явления, необходимо учитывать структуру баллистической ткани. В России при изготовлении бронежилетов используют баллистические ткани различных типов переплетения: полотняное, саржевое, сатиновое. В то же время нити в баллистической ткани состоят из множества волокон. В первых работах, посвященных численному исследованию взаимодействия бронежилета с пулей, баллистические ткани заменяли мембраной, затем использовали сетки со связанными узлами. Для исследования поведения конструкций, имеющих тканую структуру, в ряде работ из ткани выделяют повторяющийся элемент, моделируют его с высокой степенью точности, изучают его свойства при различных видах нагружения, затем полученные параметры используют для расчета таких конструкций, моделируя их как сплошную среду [6].



Рис. 1. Сертификационные испытания бронежилетов: 1 — многослойная тканевая преграда (бронежилет); 2 — регистрирующая среда; W — фактический прогиб

¹ Южно-Уральский государственный университет, физический факультет, проспект им. Ленина, 76, 454080, г. Челябинск; Долганина Н.Ю., ассистент, e-mail: dnu001@mail.ru; Сапожников С.Б., профессор, e-mail: ssb@susu.ac.ru; Маричева А.А., ассистент, e-mail: lmarich@mail.ru

Такой подход применительно к расчету взаимодействия бронежилета с пулей не подходит, поскольку в этом случае происходит значительное вытягивание и разрыв нитей. С развитием вычислительных возможностей в настоящее время можно моделировать баллистическую ткань с точностью до нити [7–9]. В некоторых работах каждая нить моделируется очень точно с учетом формы поперечного сечения объемными элементами [7], однако такие модели содержат большое количество конечных элементов, что не позволяет рассчитать пакеты больших размеров (30×30 см) с несколькими слоями ткани даже с использованием суперкомпьютеров.

При разработке бронежилетов необходимо иметь представление о механизме повреждений, которые возникают в теле человека при локальных ударных воздействиях. Поэтому учеными разных стран ведется работа по созданию теоретических и экспериментальных моделей тела человека, которые в точности повторяют форму человеческого тела и обладают такими же свойствами. Учеными университета им. Джона Хопкинса в США (Вашингтон) были созданы конечно-элементная и экспериментальная модели грудной клетки человека, а также модели ребер, грудины, хрящей, позвоночника, сердца, легких, печени, желудка, мышц и кожи [4]. Если значения ускорений, полученные экспериментально и с помощью расчета, близки, то отличие давлений существенно. Таким образом, разработки теоретических и экспериментальных моделей грудной клетки человека активно продолжаются, однако какие-либо достоверные данные пока получены не были. К тому же были созданы только модели деформирования тела человека без учета степени травмирования.

Для того чтобы использовать численную модель грудной клетки человека для проектирования бронежилетов, необходимо знать механические свойства всех ее элементов. Идентификацию параметров грудной клетки можно провести, сопоставив экспериментальные и расчетные перемещения при статическом нагружении, а также ускорения и спектры собственных частот колебаний при динамическом нагружении. Кроме того, динамическое нагружение грудной клетки реального человека должно быть низкоскоростным, чтобы не нанести травм человеку.

Реальный бронежилет второго класса [2] состоит из 60–70 слоев баллистической ткани. Типичный размер бронепанели тканевого бронежилета составляет 30×30 см. Для ткани полотняного переплетения количество точек контакта нитей утка и основы составляет 400 тысяч в одной ткани. Для всего бронежилета (65 слоев) количество контактов возрастает до 25 млн., не считая контактов между слоями в процессе ударного взаимодействия. По различным оценкам общее число контактов может достигать 40 млн. Такие задачи не могут быть в принципе решены на персональных компьютерах. Даже на высокопроизводительных вычислительных кластерах придется вводить некоторые упрощения. Эти упрощения сводятся к замене группы одинаковых по конструкции слоев одним, эквивалентным по массе. Основная трудность состоит в определении максимального количества слоев в группе без потери качества результата расчета.

Имеющиеся данные по прогнозу величины баллистического предела малослойных (до 10 слоев) тканевых пакетов показывают, что наличие трех эквивалентных слоев (вместо 10 оригинальных) позволяет получить ошибку расчета в пределах 2%, что приемлемо, даже учитывая высокую ответственность таких изделий [10]. Следует отметить, что бронепанели, имеющие в своем составе до 10 слоев, можно моделировать и рассчитывать на вычислительных кластерах типа “СКИФ Урал” без введения упрощений типа объединения ряда слоев в один эквивалентный по массе.

В настоящей статье мы рассматриваем моделирование динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами различных размеров и разным количеством слоев, а также динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека на вычислительном кластере “СКИФ Урал”. Статья организована следующим образом. В разделе 2 приведена постановка задачи. В разделе 3 описываются методы исследования и приводится описание задачи. В разделе 4 обсуждаются результаты проведенных экспериментов на вычислительном кластере. В заключении суммируются основные результаты, полученные в данной работе.

2. Постановка задачи. Были рассмотрены тканевые пакеты полотняного переплетения (рис. 2) из одного и пяти слоев ткани размером 5×5 см, а также размером 30×30 см. В работе использована арамидная ткань СВМ арт. 5601. В расчетной модели нити имеют относительную свободу перемещения с возможностью вытягивания с учетом сухого трения. Рассматривались нити, имеющие прямоугольное поперечное сечение, представленные одним оболочечным элементом по ширине с одной точкой интегрирования по толщине и выполненные из ортотропного материала с малыми поперечно-сдвиговыми свойствами.

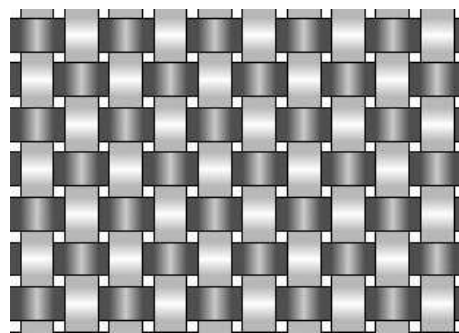


Рис. 2. Полотняное переплетение

Нити в расчетной модели могли разрушаться. Края ткани не были закреплены. В расчете индентор имел форму цилиндра с полусферическим основанием диаметром 7 мм, массой 5.5 г, с начальной скоростью 450 м/с (имитация пули пистолета ТТ) и был выполнен из абсолютно жесткого материала.

При создании модели грудной клетки человека были введены следующие упрощения: ребро представляло собой вытянутое по определенной траектории тело с эллиптическим поперечным сечением; поперечный размер ребра плавно увеличивался от позвонка к реберному хрящу; каждый позвонок имел форму призмы с эллиптическим основанием. Размеры позвонков увеличивались от верхних к нижним; поперечные, суставные и остистые отростки были исключены; мечевидный отросток грудины был исключен. В расчетах предполагалось, что каждое ребро жестко соединено с верхней частью одного позвонка, реберные хрящи истинных ребер жестко соединены с грудиной и реберный хрящ каждого ложного ребра жестко соединен с верхним реберным хрящом. В модели были запрещены все перемещения и повороты в плоскости самого нижнего поясничного позвонка, были также запрещены перемещения вдоль оси нагружения 5–7 позвонков сверху. Индентор имел форму цилиндра диаметром 3 см, массой 1 кг и был выполнен из абсолютно жесткого материала, его начальная скорость равнялась 5 м/с.

Туловище человека принято делить на три отдела: верхний, средний и нижний. В расчетах используется масса только верхнего и половины среднего отделов. Статистические исследования показывают, что масса верхнего отдела составляет 15.9% от массы тела, масса среднего отдела — 16.3%. Модель грудной клетки человека соответствует человеку ростом 150 см с обхватом грудной клетки 640 мм. Вес такого человека около 50 кг. Тогда масса двух отделов туловища составляет 12 кг. Это — вес костей, мышц, кожи и внутренних органов. При расчете все внутренние органы, а также некоторые кости, которые расположены в верхнем отделе туловища (лопатки, ключицы и плечевые кости), не рассматривались. В итоге вес скелета грудной клетки, кожи и мышц оказался равен 5.0 кг. Чтобы в расчете учесть массу мягких тканей, плотность кости была увеличена.

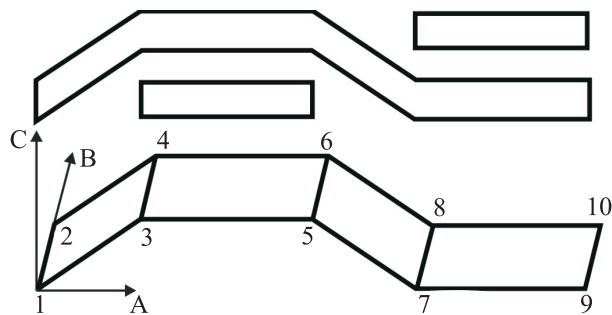


Рис. 3. Повторяющийся элемент

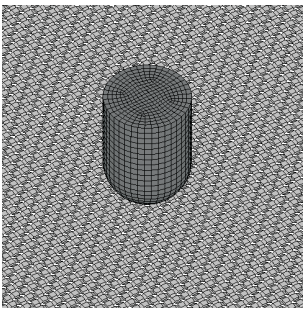


Рис. 4. Сетка конечных элементов (полотняное переплетение)

3. Методы исследования. Для решения задачи динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами с помощью пакета программ LS-DYNA геометрия и сетка конечных элементов были созданы в пакете программ ANSYS. Повторяющийся элемент ткани показан на рис. 3, на котором отмечены номера ключевых точек, координаты которых были введены в ANSYS, после чего по ключевым точкам были заданы соответствующие поверхности. Далее набор поверхностей был размножен до получения необходимых размеров модели. Затем была построена сетка конечных элементов (рис. 4).

Количество элементов, получившееся при создании сетки, представлено в табл. 1.

Таблица 1

Количество элементов				
	5 × 5 см, 1 слой	5 × 5 см, 5 слоев	30 × 30 см, 1 слой	30 × 30 см, 5 слоев
Количество элементов	20 000	77 600	547 296	2 714 080

Из списка материалов, предложенных пакетом программ LS-DYNA [11], для индентора был выбран *MAT_RIGID, для нитей — *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE. Характеристики нитей для ввода в программу LS-DYNA приведены в табл. 2. Принято, что разрушение нити происходит при достижении в ней заданной величины первого главного напряжения 3 ГПа (определено экспериментально). Механические свойства нитей и тканей определены на универсальной испытательной машине Instron 5882.

Контакт объектов моделировался командой *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE

Таблица 2
Характеристики нитей

Параметр	Обозначение	Величина
Толщина нити, мкм	T	100
Ширина нити, мкм	D	500
Модули упругости, МПа	EA	1.3×10^5
	EB	1×10^3
Плотность, кг/м ³	ρ	1 440
Коэффициент Пуассона	μ_{AB}	0.003
Модули сдвига, МПа	GAB	1×10^3
	GBC	1×10^3
	GCA	1×10^3

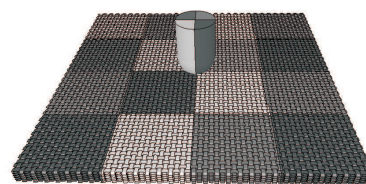


Рис. 5. Первый способ декомпозиции модели (16 ядер)

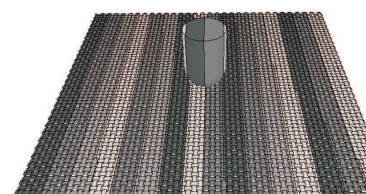


Рис. 6. Второй способ декомпозиции модели (16 ядер)

с коэффициентом трения 0.4, характерным для типичных нитей СВМ, применяемых в бронежилетах. Расчет динамики был проведен от момента удара до $t = 60$ мкс.

Верификация модели была проведена ранее в работе [10], результаты численных расчетов отлично согласуются с экспериментальными исследованиями.

На примере пакета из 5 слоев ткани размером 5×5 см были рассмотрены три различных способа декомпозиции модели на шестнадцать ядер. В первом случае модель была разбита на прямоугольные области, проходящие через всю толщину пакета (рис. 5); во втором — на полосы, расположенные вдоль одной из сторон пакета и проходящие через всю толщину пакета (рис. 6); в третьем случае декомпозиция была проведена также на полосы, расположенные вдоль одной из сторон пакета, при этом каждая полоса разбивалась еще и по толщине пакета (рис. 7).

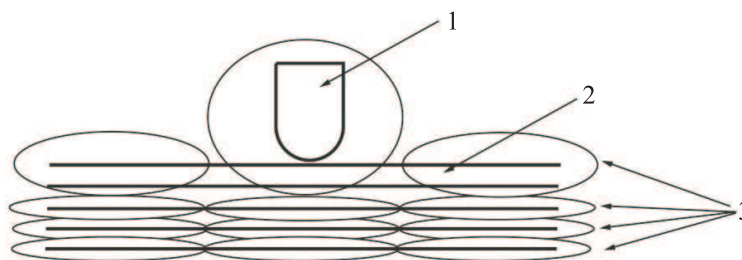


Рис. 7. Третий способ декомпозиции модели (16 ядер):
1 — пуля; 2 — пакет из 5 слоев ткани размером 5×5 см (вид сбоку); 3 — области декомпозиции

Было получено, что время расчета при использовании первого и второго способов декомпозиции одинаково, а для третьего — в 2.5 раза больше, чем в первых двух. Это объясняется тем, что контакт между слоями обрабатывается на разных ядрах, что повышает межпроцессорные обмены и увеличивает время расчета. В результате все дальнейшие расчеты были проведены с использованием первого способа декомпозиции (рис. 5).

С помощью пакета SolidWorks построена модель скелета грудной клетки. Смоделированы ребра (12 пар), грудина, грудные позвонки (12), поясничные позвонки (5), межпозвоночные диски и реберные хрящи (см. рис. 8).

Для решения задачи с помощью пакета программ LS-DYNA сетка конечных элементов была создана в пакете программ ANSYS (рис. 9). Количество элементов, получившееся при создании сетки, равно 211 112.

Модули упругости материалов костей и хрящей представлены в табл. 3 и были взяты из [12], при этом в расчете плотность кости увеличили для того, чтобы учесть массу мягких тканей. Из списка материалов, предложенных пакетом программ LS-DYNA [11], для индентора был выбран *MAT_RIGID, для костей и хрящей — *MAT_ELASTIC (упругий). Расчет динамики был проведен от момента удара до $t = 30$ мс.

4. Результаты исследований и их анализ. Расчеты были проведены на высокопроизводительном вычислительном кластере «СКИФ Урал» [13], оснащенный 166 вычислительными узлами с 2 процессорами Intel Xeon E5472 (4 ядра по 3.0 ГГц) и 8 Гб оперативной памяти на каждом узле.

Расчеты были проведены с использованием одного, двух, четырех и восьми ядер с узла вычисли-

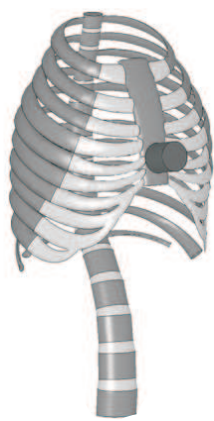


Рис. 8. Модель скелета грудной клетки человека

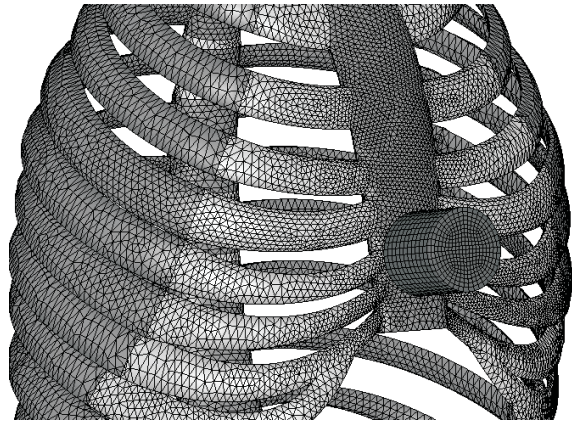
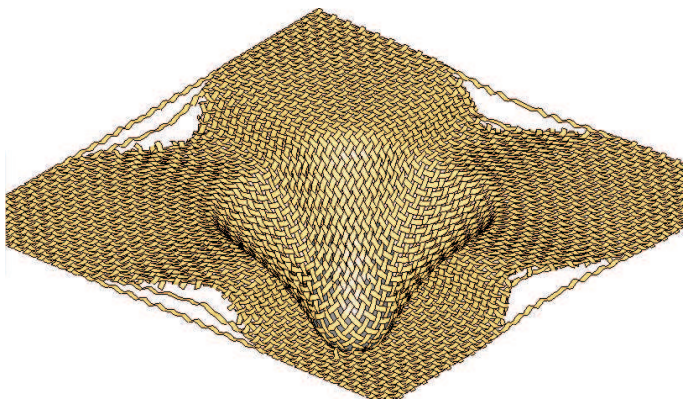


Рис. 9. Сетка конечных элементов

Таблица 3

Механические свойства материалов кости и хряща

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона
Кость	15 000	8 000	0.3
Хрящ	1 800	40	0.4



а)



б)

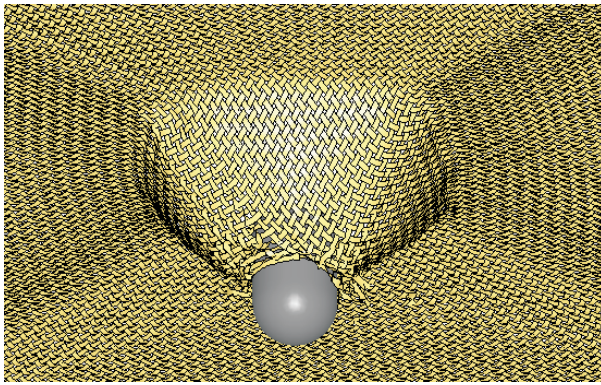
Рис. 10. Сопоставление расчетных (а) и экспериментальных (б) данных по деформированию однослойных образцов тканей размером 5 × 5 см

тельного кластера “СКИФ Урал”. На рис. 10 и 11 показаны расчетные и экспериментальные картины деформирования и разрушения одного слоя ткани размером 5 × 5 см и 30 × 30 см.

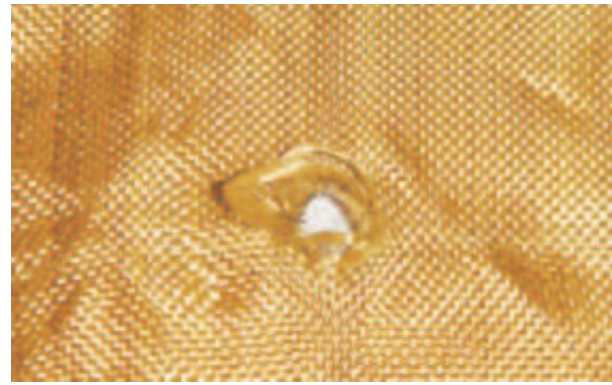
Было получено, что тканевые пакеты размером 30 × 30 см пробиваются, а тканевые пакеты размером 5 × 5 см не пробиваются. Это связано с тем, что после контакта пули с тканевым пакетом первое главное напряжение в нитях постоянно возрастает, в небольших по размеру пакетах ударная волна быстрее доходит до края пакета и возвращается, разгружая место контакта.

На примере задачи с одним слоем ткани размером 30 × 30 см показано сравнение ускорений при расчете с использованием одного, двух, четырех и восьми ядер с узла вычислительного кластера “СКИФ Урал” (рис. 12). Ускорение вычислялось по формуле T_1/T_n , где T_1 — время, затраченное на решение теста на восьми процессорных ядрах, T_n — время, затраченное на решение этой же задачи на n процессорных ядрах.

Было получено, что наилучшая масштабируемость получается при использовании четырех ядер с узла. Время расчета при использовании четырех ядер с узла в среднем на 20% меньше по сравнению со временем расчета при использовании 1, 2 и 8 ядер с узла.



а)



б)

Рис. 11. Сопоставление расчетных (а) и экспериментальных (б) данных по пробою однослойных образцов тканей размером 30×30 см

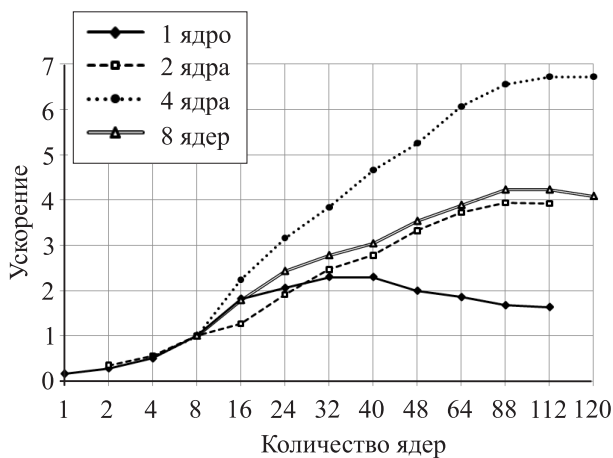


Рис. 12. Сравнение ускорений на вычислительном кластере “СКИФ Урал” при использовании 1, 2, 4, 8 ядер с узла (1 слой ткани размером 30×30 см)

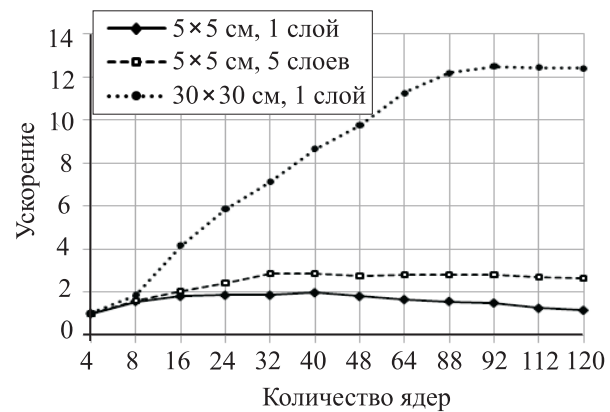


Рис. 13. Сравнение ускорений на вычислительном кластере “СКИФ Урал” (4 ядра с узла, $T_1 = 4$)

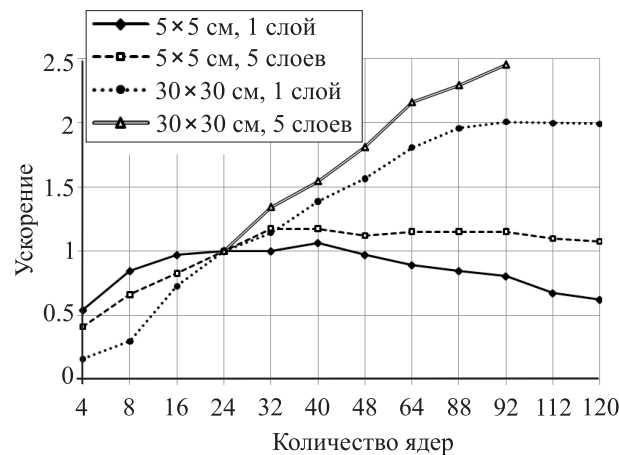


Рис. 14. Сравнение ускорений на вычислительном кластере “СКИФ Урал” (4 ядра с узла, $T_1 = 24$)

Графики ускорений при использовании 1, 2, 4 и 8 ядер с узла качественно похожи. Поэтому приведены результаты на примере использования четырех ядер с узла (рис. 13 и 14). На рис. 13 приведены графики

ускорений, где $T_1 = 4$, а на рис. 14 — $T_1 = 24$. Пакет из пяти слоев ткани размером 30×30 см не может быть рассчитан меньше чем на 24 ядрах и больше чем на 92 ядрах. Это связано с выделением оперативной памяти на каждое ядро для решения задачи, а также с тем, что декомпозиция задачи производится на одном узле, на котором максимум 8 Гб оперативной памяти.

Таблица 4
Время выполнения расчетов с использованием четырех ядер с узла

№ пп.	Количество вычислительных ядер	Время выполнения, сек			
		5 × 5 см, 1 слой	5 × 5 см, 5 слоев	30 × 30 см, 1 слой	30 × 30 см, 5 слоев
1	4	61	592	4 987	—
2	8	39	368	2 688	—
3	16	34	294	1 100	—
4	24	33	243	800	6 326
5	32	33	207	700	4 713
6	40	31	206	577	4 100
7	48	34	217	512	3 500
8	64	37	212	443	2 934
9	88	39	211	409	2 764
10	92	41	212	399	2 584
11	112	49	221	401	—
12	120	53	226	402	—

Время, за которое были произведены расчеты по динамическому взаимодействию индентора и различных тканевых пакетов с использованием четырех ядер с узла, приведено в табл. 4.

В расчетах рассматривалось одинаковое воздействие (пуля, ее скорость и время процесса) на различные объекты, отличающиеся размером и количеством слоев. В этих случаях результаты воздействия были принципиально разными: наличие или отсутствие сквозного пробоа, сохранение или исчезновение контакта с пулей, множественные контакты разорванных нитей с соседними нитями и даже с нитями из других слоев. Эти явления могут объяснить относительно хорошую масштабируемость для многослойных пакетов и сравнительно низкую — для однослойных пакетов. Для пакетов больших размеров (30×30 см) относительно хорошая масштабируемость по сравнению с пакетами небольших размеров (5×5 см) объясняется тем, что на один процессор приходится больший объем материала и, соответственно, меньшие межпроцессорные обмены в зоне контакта индентора с тканевым пакетом, где происходит разрушение и вытягивание нитей (рис. 15).

Использование большого количества процессоров заставляет разбивать объект на небольшие зоны, в которых происходит разрушение нитей и множественные контакты между элементами из разных зон, что заставляет усиливать межпроцессорные обмены и снижает, в итоге, масштабируемость. В пакете программ LS-DYNA нет такой

Таблица 5
Время выполнения расчетов на
вычислительном кластере
“СКИФ Урал”

№ пп.	Вычисли- тельные ядра	Время выполнения, сек
1	1	497921
2	2	256300
3	4	132947
4	8	69716
5	16	35508
6	24	24437
7	32	19386
8	64	11827
9	128	9250
10	192	10330
11	224	10935

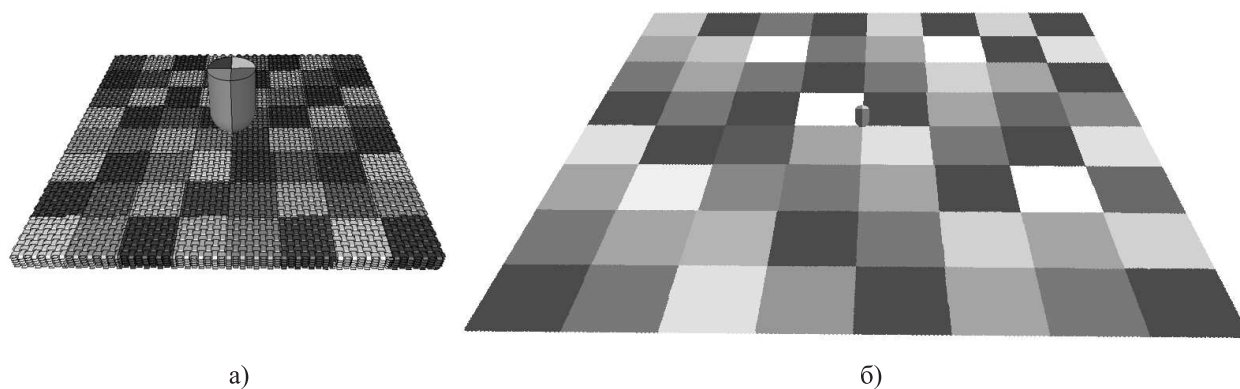


Рис. 15. Декомпозиция модели (64 ядра): а) пакет размером 5×5 см; б) пакет размером 30×30 см

функции, как сгущение при декомпозиции модели, с помощью которой можно было бы увеличить области декомпозиции вблизи контакта пули с тканевым пакетом.

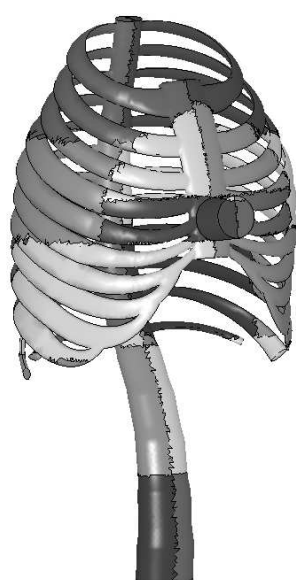


Рис. 16. Декомпозиция модели (16 ядер)

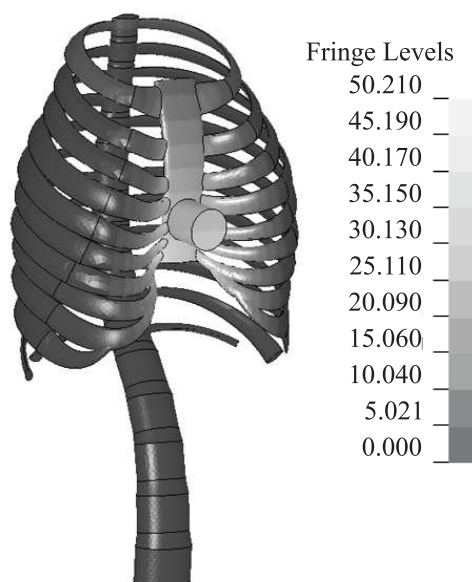


Рис. 17. Перемещения индентора и элементов грудной клетки (значения на шкале указаны в мм)

Декомпозиция модели скелета грудной клетки человека на примере 16 ядер показана на рис. 16. Перемещения индентора и элементов грудной клетки показаны на рис. 17.

Ускорение для задачи динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека вычислялось по формуле T_1/T_n , где T_1 — время, затраченное на решение теста на одном процессорном ядре, T_n — время, затраченное на решение этой же задачи на n процессорных ядрах (рис. 18).

Время, за которое были произведены расчеты по динамическому взаимодействию индентора и скелета грудной клетки человека, приведено в табл. 5.

При рассмотрении задачи о деформировании грудной клетки при низкоскоростном ударе индентором отмечается хорошая масштабируемость вплоть до 128 ядер. Далее эффективность распараллеливания снижается из-за распределения индентора и области контакта с грудиной на несколько ядер, что приводит к увеличению межпроцессорных обменов и увеличению времени расчета.

5. Заключение. Вычислительные возможности кластеров позволяют решать сложные контактные задачи, в которых нельзя использовать механику сплошной среды, так как результаты получаются неадекватными. В таких задачах необходимо создавать геометрически подобную модель и рассматривать взаимодействие этой модели не только с внешними воздействиями, но и между элементами внутри этой модели. Это — задачи ударного взаимодействия тканевого бронежилета с пулей, геологические задачи

обработки почвы, моделирование схода лавин, компактирование (уплотнение) порошков и др. В задаче ударного взаимодействия тканевого бронежилета с пулей мы рассматривали нити как сплошную среду, в реальности же каждая нить состоит еще из порядка 150–200 волокон, которые также взаимодействуют между собой. В таких задачах важно создать такую геометрически подобную модель, чтобы результаты расчетов согласовывались с экспериментом, но в то же время не усложнять модель настолько, что она окажется неприемлемой для расчетов даже на суперкомпьютерах.

В настоящей статье проведены численные эксперименты с использованием пакета программ LS-DYNA по исследованию масштабируемости задач динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами различных размеров и разным количеством слоев, а также динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека. Для тканевых пакетов больших размеров (30×30 см) относительно хорошая масштабируемость по сравнению с тканевыми пакетами небольших размеров (5×5 см) объясняется тем, что на один процессор приходится больший объем материала и, соответственно, меньшие межпроцессорные обмены в зоне контакта индентора с тканевым пакетом, в которой происходит разрушение и вытягивание нитей. Использование большого количества процессоров заставляет разбивать объект на небольшие зоны, в которых происходит разрушение нитей и множественные контакты между элементами из разных зон, что заставляет увеличивать межпроцессорные обмены и снижает, в итоге, масштабируемость.

При рассмотрении задачи о деформировании грудной клетки человека при низкоскоростном ударе индентором отмечается хорошая масштабируемость вплоть до 128 ядер. Далее эффективность распараллеливания снижается из-за распределения индентора и области контакта с грудиной на несколько ядер, что приводит к увеличению межпроцессорных обменов и увеличению времени расчета.

Задача динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека масштабируется намного лучше, чем задачи ударного нагружения тканевых пакетов различных размеров и разным количеством слоев ткани. Это объясняется тем, что в тканевых пакетах возникают множественные контакты между нитями внутри одного слоя и между нитями из разных слоев ткани, в то время как контакт между скелетом грудной клетки человека и индентором происходит по небольшой поверхности. Таким образом, задачи с множественными контактами масштабируются хуже.

В результате проведенных исследований по масштабируемости задач было получено, что декомпозицию объектов необходимо обеспечивать таким образом, чтобы контактные зоны приходились на минимальное количество ядер, и что необходимо назначать минимально возможное количество контактирующих объектов.

Полученные нами результаты и методы исследования сопротивления тканевых преград ударам огнестрельного оружия используются при разработке новых средств защиты тела человека, значительно сокращая этап предварительной оценки служебных свойств такого рода изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Recht R.F.* Analytical modeling of plate penetration dynamics // High Velocity Impact Dynamics / J.A. Zucas, R.F. Recht. New York: Wiley, 1990.
2. ГОСТ Р50744-95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования.
3. NIJ Standard — 0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor.
4. *Roberts J.C., Biermann P.J., O'Connor J.V., Ward E.E., Cain R.P., Carkhuff B.G., Merkle A.C.* Modeling nonpenetrating ballistic impact on a human torso // Johns Hopkins Applied Physics Laboratory Technical Digest. 2005. **26**, N 1. 85–92.
5. *Григорян В.А., Буланова М.Е., Дашевская О.Б., Маринин В.М., Хромушин В.А.* Влияние некоторых факторов на погнвоосколочную стойкость текстильной брони из основных арамидных тканей // Вопросы оборонной техники. Сер. 15: Композиционные и неметаллические материалы в машиностроении. Вып. 3(140)–4(141). М.: МНЦ “Информтехника”, 2005. 23–25.
6. *Ivanov D.S., Baudry F., van den Broucke B., Lomov S.V., Xie H., Verpoest I.* Failure analysis of triaxial braided composite // Composites Science and Technology. 2009. **69**, N 9. 1372–1380.

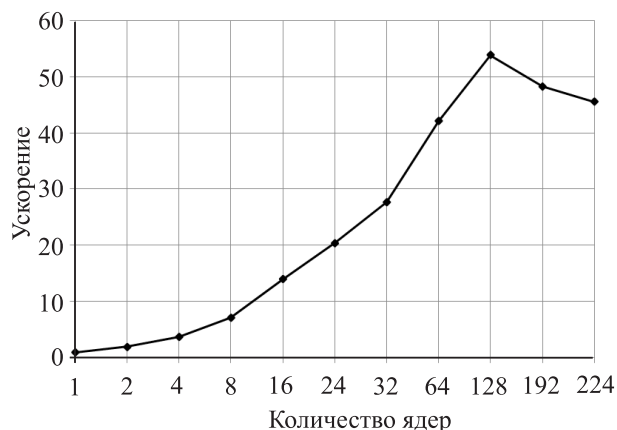


Рис. 18. Ускорение

7. *Broos H., Herlaar K.* Explicit FE modeling of ballistic impact on textile armour systems // Finite Element Modelling of Textiles and Textile Composites. St. Petersburg, 2007 (CD edition).
8. *Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б.* Связь динамической прочности арамидных тканей с искривлением нитей в них // Наука и Технологии. Труды XXV Российской школы и XXXV Уральского семинара, посвященных 60-летию Победы. М.: 2005, 103–110.
9. *Сапожников С.Б., Долганина Н.Ю., Сахаров С.А.* Моделирование динамики взаимодействия ударника и многослойного тканевого пакета // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные и неметаллические материалы в машиностроении. Вып. 3(140)–4(141). М.: МНЦ “Информтехника”, 2005. 38–41.
10. *Sapozhnikov S.B., Forental M.V., Dolganina N.Yu.* Improved methodology for ballistic limit and blunt trauma estimation for use with hybrid metal/textile body armor // Finite Element Modelling of Textiles and Textile Composites. St. Petersburg, 2007 (CD edition).
11. LS-DYNA Keyword user's manual. **970**. LSTC, 2003.
12. Разрушение. Том 7. Разрушение неметаллов и композитных материалов. Часть II. Органические материалы (стеклообразные полимеры, эластомеры, кость) / Под ред. Ю.Н. Работнова. М.: Мир, 1976.
13. Высокопроизводительный вычислительный кластер “СКИФ Урал” (http://supercomputer.susu.ru/computers/ckif_ural/).

Поступила в редакцию
19.03.2010
